

Pemantauan, Proteksi, dan Ekualisasi Baterai *Lithium-ion* Tersusun Seri Menggunakan Konverter *Buck-Boost* dan LC Seri dengan Kontrol *Synchronous Phase Shift*

Diaz Ficry Arfianto, Dimas Anton Asfani, dan Daniar Fahmi.

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: diaz12@mhs.ee.its.ac.id, anton@ee.its.ac.id, daniar.fahmi@ee.its.ac.id

Abstrak --- Baterai jenis *lithium-ion* kini dipilih sebagai penyimpan energi pada kendaraan listrik dikarenakan *power density* dan *energy density* yang lebih besar dibandingkan baterai jenis lain. Namun, baterai *lithium ion* memiliki kekurangan yakni sangat sensitif terhadap *overcharge*. Selain itu, masalah ketidakseimbangan kapasitas baterai tersusun seri dapat mempengaruhi performa baterai secara keseluruhan. Dalam tugas akhir ini diimplementasikan skala laboratorium sistem pemantauan dan proteksi pada empat sel baterai *lithium-ion* tersusun seri agar baterai lebih aman dari *overvoltage*, *undervoltage* dan *overheat*. Selain itu ekualisasi untuk menyeimbangkan kapasitas baterai sehingga masa hidup dan kapasitas baterai dapat diperpanjang. Hasil pengujian skala laboratorium menunjukkan pemantauan tegangan mendapat *error* terbesar 1,25% dan pemantauan suhu mencapai *error* terbesar 4,97%. Sistem proteksi baterai dapat bekerja memutus koneksi baterai sehingga menjadi sirkuit terbuka jika mendeteksi *overvoltage*, *undervoltage*, dan *overheat*. Serta ekualisasi 4 baterai *lithium* tersusun seri dapat dilakukan dengan waktu tempuh 48 menit.

Kata kunci— Baterai *Lithium-ion*, Pemantauan dan Proteksi Baterai, Ekualisasi, Konverter *Buck-Bosot* dan LC seri.

I. PENDAHULUAN

BATERAI merupakan penyimpan energi yang sangat penting bagi prasyarat kendaraan listrik saat ini. Tanpa adanya baterai, kendaraan listrik tidak akan bisa melaju sebagaimana mestinya. Baterai berbasis *Lithium* memiliki banyak kelebihan dibanding baterai konvensional seperti *Nickel-Cadmium*, *Nickel-Metalhydrate* ataupun *Lead Acid* [1]. Kelebihan baterai berbasis *Lithium* adalah densiti energi yang tinggi, densiti daya yang tinggi, *self-discharge* yang rendah, *fast charging*, rasio massa-ke-energi yang tinggi, tidak ada *memory effect*, tahan lama jika proses *charging* sesuai [2]. Namun, baterai berbasis *Lithium* juga memiliki kekurangan kurang toleran, sehingga memerlukan pemantauan dan prosedur proteksi yang akurat untuk memastikan tidak *overcharge* pada salah satu sel baterai serta memastikan baterai tidak *overheat* yang dapat mengurangi umur baterai.

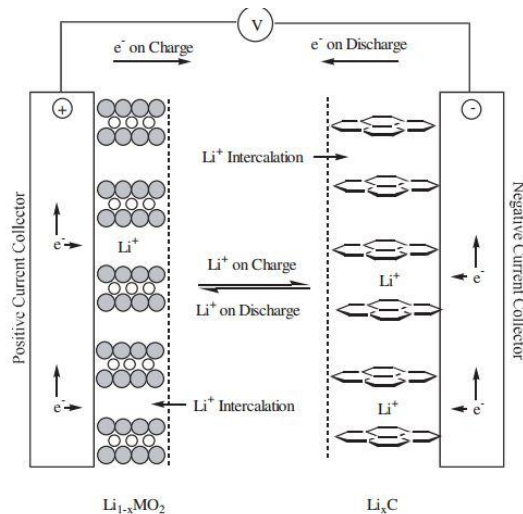
Perlunya baterai sebagai sumber energi pada sumber listrik menitikberatkan pada keandalan baterai dan keamanan dalam penggunaannya. Baterai *Lithium* dalam bentuk *pack* memungkinkan memiliki perbedaan karakteristik pada setiap sel di dalamnya baik dalam karakteristik kimia maupun kelistrikannya [3]. Ketidaksamaan ini dapat menyebabkan baterai panas dengan keadaan terparahnya terbakar yang membuat ekualisasi baterai menjadi tidak terdispensasi untuk menjaga baterai dan memanjangkan umur baterai [3]. Metode yang digunakan pada proses ekualisasi pun bermacam-macam, proses ekualisasi harus efisien dan juga mudah diaplikasikan serta mempunyai keandalan yang tinggi. Metode yang sesuai dengan kriteria tersebut salah satunya adalah *buck-boost* LC seri *converter*[4].

Pada tugas akhir ini direncanakan proses ekualisasi menggunakan metode *buck-boost* LC seri *converter* dengan *phase shift controller* yang memiliki kemampuan lebih baik dari metode lain (efisiensi, kecepatan pengisian, kemudahan membuat) [5,6]. Proses ekualisasi ini direncanakan secara otomatis bergabung dengan sistem pemantauan dan proteksi melanjutkan dari tugas akhir yang sudah dikerjakan sebelumnya. Selain itu, proses pemantauan tegangan dan suhu serta proteksi baterai terhadap *overcharge*, *overdischarge*, dan *overheat* [2,4] juga akan diimplementasikan demi menjadi kondisi baterai tetap baik sehingga tetap aman dan berumur panjang.

II. KARAKTERISTIK BATERAI *LITHIUM-ION*

A. Baterai *Lithium-ion*

Baterai *Lithium-ion* merupakan salah satu jenis baterai yang banyak digunakan pada kendaraan listrik maupun perangkat elektronik dimasa kini. Elektrode aktif pada baterai *Lithium-ion* merupakan *lithium metal oxide* untuk elektrode positif sedangkan *carbon* pada elektrode negatif. Material ini menganut arus kolektor logam dengan bahan pengikat, biasanya berupa *polivinilidena flourida* (PVDF) atau *kopolimer polivinilidena fluorida-hexafluoropropylene* (PVDF-HFP), dan penconduktif.

Gambar 1. Proses *Electrochemical* dalam Baterai *Lithium-ion*

B. Perbandingan Baterai *Lithium-ion* dengan Jenis Lain

Baterai *lithium-ion* memiliki kelebihan dibandingkan jenis lain yang dapat dilihat pada Tabel 1 berikut :

Tabel 1.

Perbandingan Baterai *Lithium-ion* dengan Jenis lain [1]

Type Baterai	Lead-acid	Ni-Cd	Ni-MH	<i>Lithium-ion</i>
Energy Density (W/kg)	30-50	45-80	60-120	110-160
Power Density	180	150	250-1000	1800
Nominal Voltage	2 V	1,25 V	1,25 V	3,6 V
Overcharge Toleran	High	Moderate	Low	Very Low
Self-discharge	Low	Moderate	High	Very Low
Operating Temperature	-20 - 60 °C	-40 - 60 °C	-20 - 60 °C	-20 - 60 °C
Cycle Life	200 - 300	1500	300 - 500	500 - 1000

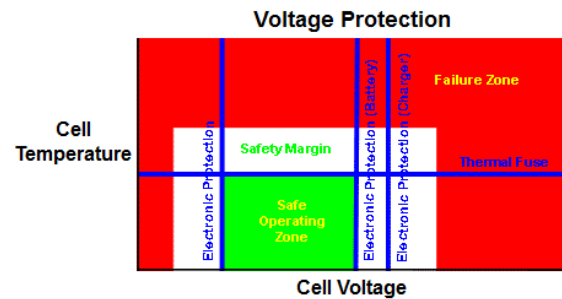
C. Sistem Manajemen baterai

Pemantauan kondisi baterai merupakan hal penting dalam Baterai Manajemen Sistem (BMS). Pemantauan baterai digunakan untuk memeriksa dan mengontrol status baterai dalam kondisi aman saat sedang beroperasi. Beberapa fungsi dari BMS antara lain sebagai berikut :

1. Mampu untuk memprediksi level energi atau kapasitas baterai terpakai (*SOC prediction capability*). Dengan mengetahui SOC kita bisa menentukan kapan baterai harus di-*charging*, dan kapan harus berhenti men-*charging*. Dengan *charging* maupun *discharging* yang tepat maka baterai dapat berumur lebih lama karena reaksi kimiawi yang tidak dapat balik bisa dihindari.
2. Mampu untuk memutus dan menyambung baterai dari beban dan dari charger jika terjadi gangguan secara otomatis. Jenis gangguan yang akan memicu pemutusan otomatis misalnya keadaan sudah terisi penuh (*fully charged*), keadaan sudah SOC hampir nol (*almost fully discharged*), terbeban lebih yang menyebabkan *overcurrent* atau *overheated* dan lain-lain.
3. Mampu untuk melakukan ekualisasi sehingga baterai memiliki tegangan yang sama dengan harapan kapasitas pada baterai dapat sama.

D. Metode Proteksi Baterai

Perlindungan elektrik pada baterai terkait dengan *over voltage*, dan *under voltage*. Selain itu baterai *lithium-ion* rentan memanaskan seiring proses *charge-discharge* sehingga perlu ada proteksi terhadap *overheat*.



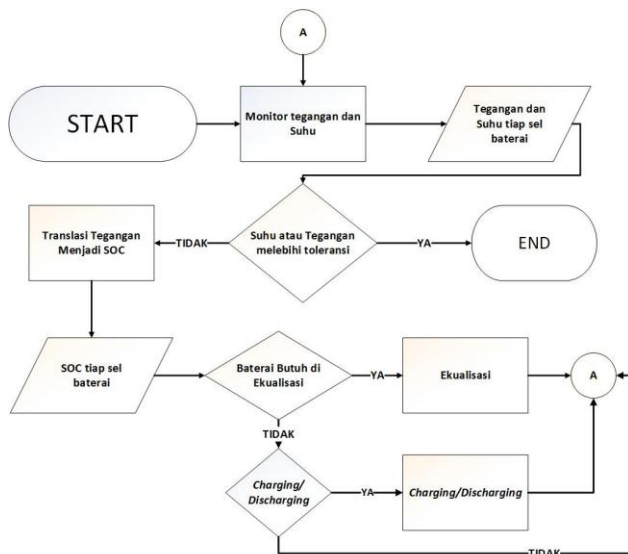
Gambar 2. Diagram proteksi tegangan dan suhu [7]

Pada gambar 2. menunjukkan skema untuk batas atas dan bawah tegangan, serta perlindungan suhu. Baterai dapat rusak baik oleh *overvoltage* yang dapat terjadi selama *charging* dan oleh *undervoltage* akibat *discharge* yang berlebihan, sehingga batas tegangan untuk kedua proses tersebut harus diperhatikan. Dengan menyediakan *charger* dengan masukan tegangan disertai sensor tegangan dan sensor suhu pada baterai, *charger* bisa dipotong ketika baterai mencapai batas kontrol yang telah ditentukan.

III. PERANCANGAN PEMBUATAN SISTEM PEMANTAUAN, PROTEKSI DAN EKUALISASI

Sistem keseluruhan terdiri dari tiga sub-sistem yakni pemantauan , proteksi, dan ekualisasi. Perancangan sistem pemantauan meliputi pemantauan tegangan, estimasi state of charge, dan pemantauan suhu. Proteksi meliputi proteksi *overvoltage*, *undervoltage*, dan *overheat*. Terakhir sistem ekualisasi menggunakan konverter *buck-boost* dan LC seri dengan kontrol *synchronous phase shift*.

Sistem bermula dengan memantau tegangan dan suhu sehingga didapat tegangan dan suhu tiap sel baterai. Kemudian sistem proteksi akan menginterupsi jika ada tegangan atau suhu baterai yang melebihi toleransi. Setelah itu *state of charge* akan ditranslasi dari tegangan. Lalu jika membutuhkan ekualisasi maka ekualisasi akan berlangsung. Jika ingin melakukan proses *charge & discharge* maka akan berlangsung. Jika tidak melakukan keduanya sistem akan mengulang kembali ke awal (*idle*).



Gambar 3. Diagram blok perancangan sistem keseluruhan

A. Sistem Pemantauan

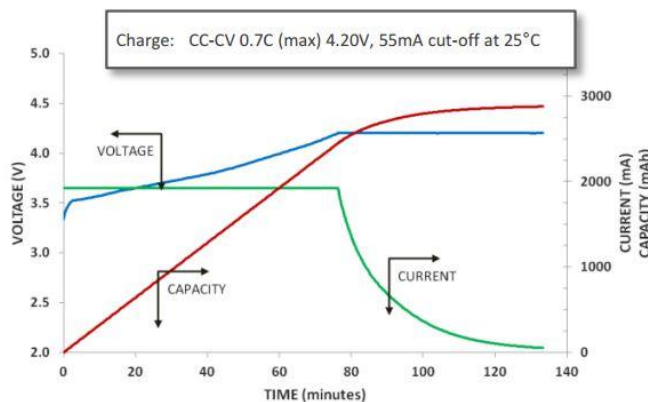
Pemantauan baterai *lithium-ion* tersusun seri memerlukan persangkat tambahan berupa *battery IC monitoring* yang dapat digunakan untuk memantau tegangan baterai pada tiap sel. Prinsip kerja IC ini sebenarnya merupakan *multiplexer* sehingga memantau tegangan bergantian. Pemantauan tegangan menggunakan IC BQ76925. Selain *multiplexer*, ICBQ76925 merupakan *levelshifter* sehingga keluaran IC perlu di kembalikan dengan persamaan berikut :

$$V_B = V_{out} \cdot Gain \quad (1)$$

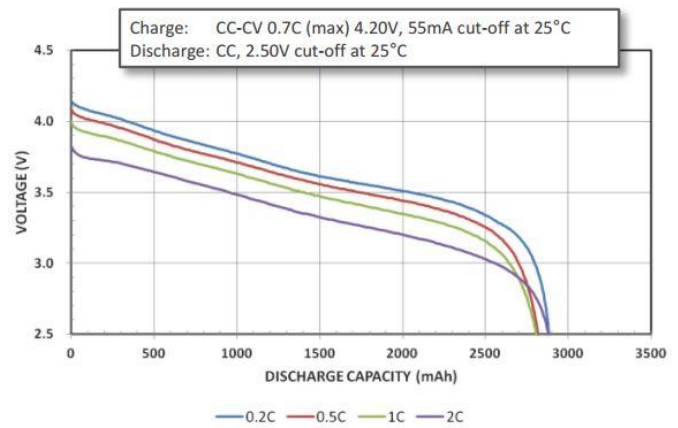
Sedangkan pemantau suhu menggunakan sensor suhu LM35. Keluaran LM35 merupakan tegangan dengan skala 10 mV/°C sehingga keluaran tegangan LM35 mengikuti persamaan berikut:

$$T_B = \frac{V_{sensor}}{0,01} \quad (2)$$

Terakhir pada sistem pemantauan ingin didapatkan state of scharge baterai *Lithium-ion*. Cara mendapatkan *state of charge* ini didapatkan dengan *charge* dan *discharge test*. Charge dan discharge test dilakukan untuk mendapatkan kurva sesuai datasheet seperti pada gambar 4 dan 5.



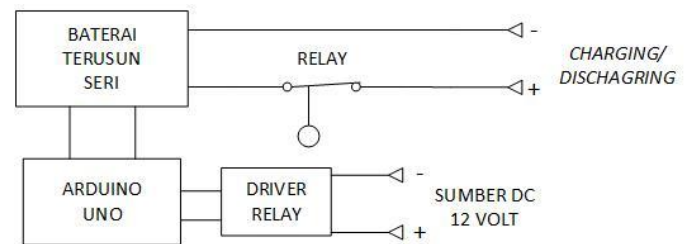
Gambar 4. Kurva Teangan saat Charging



Gambar 5. Kurva Tegangan saat Discharging

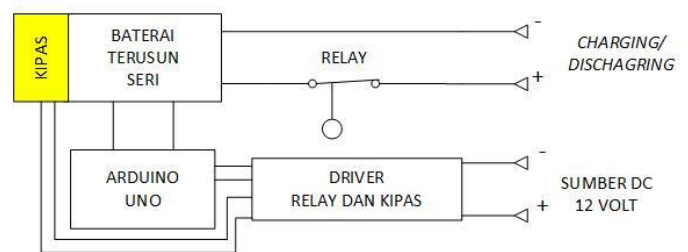
B. Sistem Proteksi

Sistem proteksi dari baterai *lithium-ion* harus menjaga baterai agar tetap dalam kondisi stabil. Baterai *lithium-ion* harus terjaga dari *overvoltage*, *undervoltage* dan *overheat*.



Gambar 6. Skema Proteksi Overvoltage dan Undervoltage

Gambar 6. Merupakan Proteksi *Overvoltage* dan *undervoltage* merupakan sistem kesatuan dengan dua batas yang berbeda. Proteksi *overvoltage* akan memutus rangkaian jika mendeteksi salah satu baterai menyentuh tegangan 4.1 volt sedangkan pada proteksi *undervoltage* akan memutus rangkain jika mendeteksi salah satu baterai menyentuh tegangan 2.8 Volt

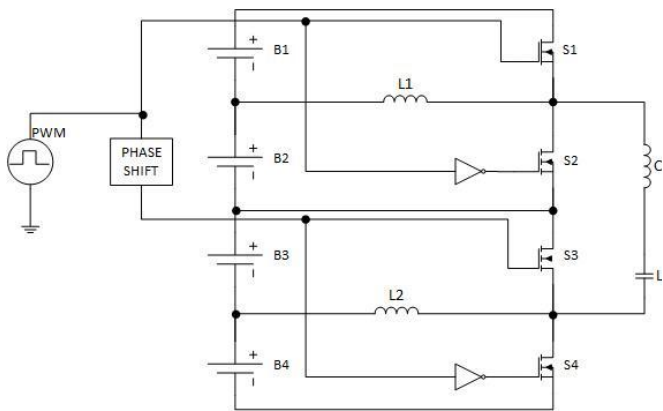


Gambar 7. Skema Proteksi Overheat

Gambar 7. merupakan skema proteksi *overheat* yang memiliki dua tahap. Tahap pertama adalah preventif dengan menyalakan kipas untuk mendinginkan baterai. Kipas akan nyala jika mendeteksi baterai mencapai suhu 35 °C, sedangkan pemutusan relay akan dimulai jika baterai menyentuh suhu 45 °C.

C. Sistem Ekualisasi Menggunakan Konverter Buck-Boost dan LC seri dengan Kontrol Synchronous Phase Shift

Sistem ekualisasi menggunakan empat sel baterai *lithium ion* sebagai objeknya. Adapaun rangkain ekualisasi sebagai berikut :



Gambar 8. Rangkaian Ekualisasi menggunakan Konverter Buck-Boost dan LC seri dengan Kontrol *Synchronous Phase Shift*.

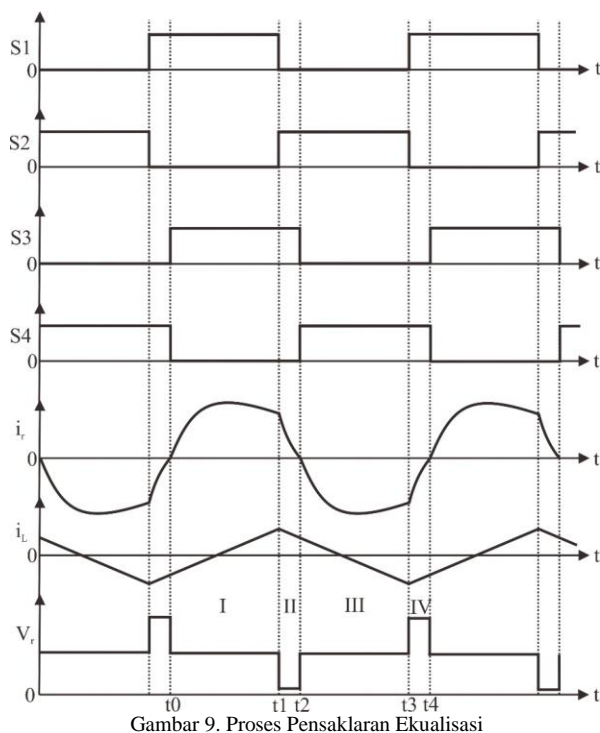
Sistem ini menggunakan empat buah *mosfet* sebagai pensaklaranya yang menghubungkan baterai dengan rangkaian *resonant* (LC Seri). Perhitungan nilai kapasitor dan induktor seri dapat didapatkan dengan persamaan berikut :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

Sedangkan L1 dan L2 dapat disesuaikan dengan arus yang ingin dialirkan dengan persamaan berikut :

$$V_{Baterai} = L \cdot \frac{di}{dt} = L \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (4)$$

Proses ekualisasi menggunakan kontrol *synchronous phase shift* dimana dua dari empat saklar mengalami pergeseran waktu on. Ini dimaksudkan agar proses transfer pada rangkaian LC seri dapat terjadi sehingga arus akan lebih cepat ditransfer kepada baterai pada waktu berikutnya. Proses pensaklaran dijelaskan pada gambar 9.



Gambar 9. Proses Pensaklaran Ekualisasi

Proses pensaklaran dapat dijelaskan sebagai berikut.

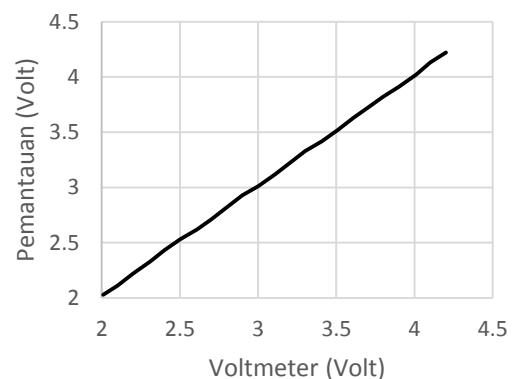
1. Kondisi I, dimana induktor Lr dan kapasitor Cr terhubung dengan B1 dan B2. Oleh karena itu kapasitor Cr terisi muatan oleh B1 dan B2, dan arus Lr dan Cr (i_r) meningkat dari nol. Pada kondisi ini energi ditransfer dari B1 dan B2 menuju Lr dan Cr. Dapat dilihat dari bentuk gelombangnya seperti yang ditunjukkan pada dari periode t_0 sampai t_1 .
2. Kondisi II, dimana S2 dan S3 dalam kondisi on, sebaliknya S1 dan S4 off. Rangkaian induktor L dan kapasitor Cr terhubung singkat karena S2 dan S3 on. Kapasitor Cr akan terisi dari muatan yang berasal dari induktor Lr menyebabkan transfer energi dari induktor Lr dan i_r akan berkrang mendekati nol.
3. Kondisi III, dimana S2 dan S4 dalam kondisi on, sebaliknya S1 dan S3 off. Induktor Lr dan kapasitor Cr terhubung dengan B3 dan B4. B3 dan B4 terisi muatan oleh kapasitor Cr sedangkan i_r akan berkurang dari nol menjadi negatif. Oleh karena itu proses ini adalah transfer energi dari Lr dan Cr menuju B3 dan B4.
4. Kondisi IV, dimana S1 dan S4 dalam kondisi on, sebaliknya S2 dan S3 off. Oleh karena itu induktor Lr dan kapasitor Cr terhubung dengan keempat baterai yang terhubung seri. B1, B2, B3, dan B4 terisi muatan oleh induktor Lr dan kapasitor Cr serta i_r meningkat menuju nol.

IV. ANALISIS PENGUJIAN SISTEM

Analisis sistem terdiri dari pengujian pemantauan, proteksi dan ekualisasi pada baterai *lithium ion* tersusun seri sebanyak empat buah. Pengujian dilakukan pada tiap-tiap sub sistem.

A. Analisis Data Pengujian Pemantauan

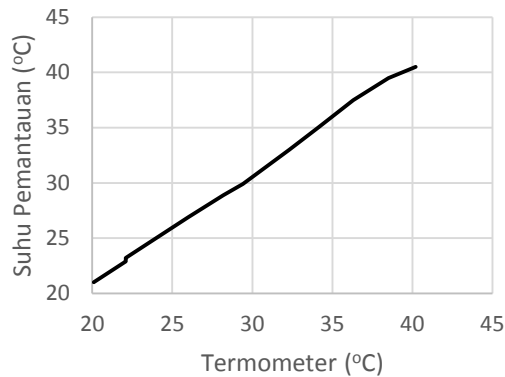
Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui *error* pada pemantauan tegangan dan suhu serta mengetahui estimasi *state of charge*.



Gambar 10. Korelasi Pengukuran Voltmeter dan Pemantauan Tegangan

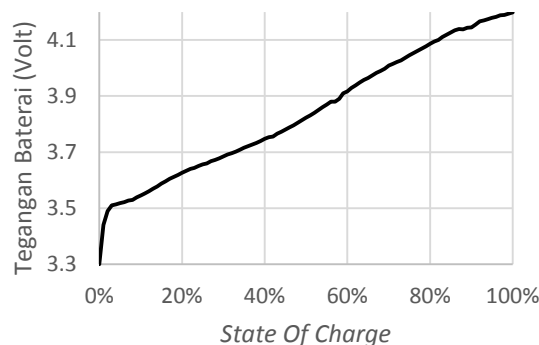
Gambar 10 menunjukkan korelasi pengukuran dengan voltmeter dengan pemantauan tegangan oleh sistem. Pengukuran voltmeter menggunakan GW Instek GDM 8245 (akurasi: $\pm 0,003\% +4$). Uji korelasi *pearson* pada pemantauan tegangan mencapai 0,9999 menunjukkan korelasi yang kuat antara pengukuran *voltmeter* dengan pemantauan tegangan.

Sedangkan *error* terbesar pada pengujian ini mencapai 1,25 %.



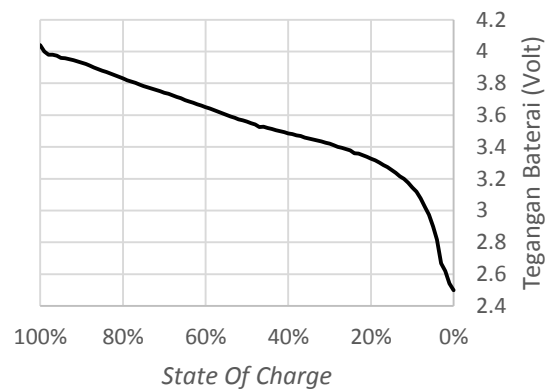
Gambar 11. Korelasi Pemantauan Suhu dengan Termometer dengan Pemantauan Suhu

Gambar 11 menunjukkan korelasi pengukuran dengan termometer dengan pemantauan suhu pada sistem. Pengukuran suhu menggunakan termometer infrared KRISBOW KW06-559 (akurasi : $\pm 1,5\%$). Uji *korelasi pearson* pada pemantauan tegangan mencapai 0,9993 menunjukkan *korelasi* yang kuat antara pengukuran termometer dengan pemantauan suhu. Sedangkan *error* terbesar pada pengujian ini mencapai 4,97 %.



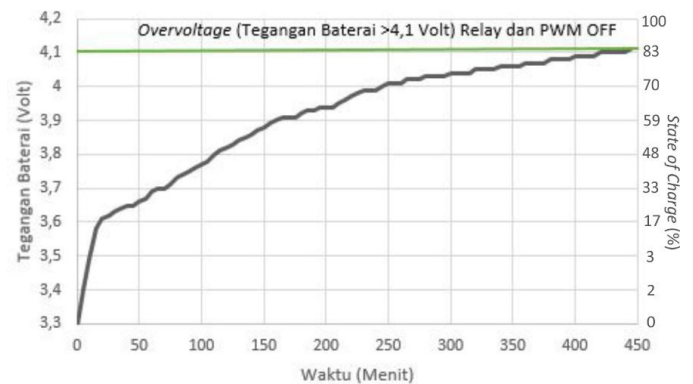
Gambar 12. Kurva State of Charge dengan Tegangan saat Charging

Gambar 12 merupakan kurva *state of charge* saat proses *charging* dimana *charging* menggunakan tegangan konstan 4,2 volt dan arus 1,45 A (0,5C). Dapat dilihat pada kurva bahwa *state of charge* pada proses *charging* tidak linear terhadap kenaikan tegangan. Sedangkan gambar 13 merupakan kurva *state of charge* saat proses *discharge* dimana proses ini baterai didischarge dengan arus konstan 1,45 A (0,5C). Ini juga membuktikan bahwa *state of charge* pada proses *discharging* tidak linear terhadap penurunan tegangan.



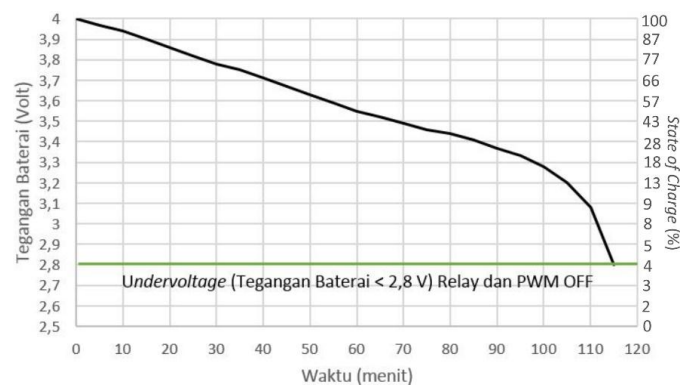
Gambar 13. Kurva State of Charge dengan Tegangan saat Discharging

B. Analisis Data Pengujian Proteksi



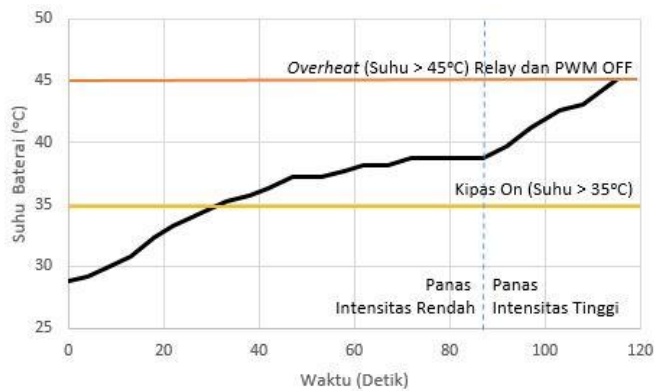
Gambar 14. Grafik Pengujian Overvoltage

Gambar 14 menunjukkan proses proteksi adari overvoltage. Dari gambar dapat dilihat bahwa proteksi akan memutus rangkaian (PWM dan relay off) ketika tegangan emncapai 4,1 volt.



Gambar 15. Grafik Pengujian Undervoltage

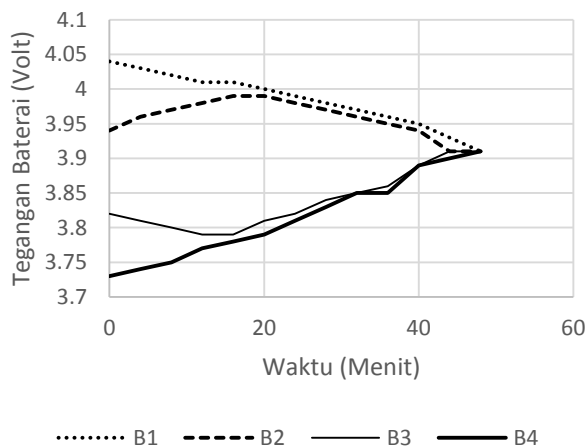
Gambar 15 menunjukkan proses proteksi dari *undervoltage*. Dari gambar dapat dilihat bahwa proteksi akan memutus rangkaian (PWM dan *relay off*) ketika tegangan mencapai 2,8 volt.



Gambar 16. Grafik Pengujian Overheat

Gambar 16 menunjukkan proses proteksi *overheat*. Pada pengujian proteksi *overheat* digunakan dua intensitas yang berbeda pada sumber panas. Saat pengujian intensitas panas rendah suhu baterai mencapai 35 °C sehingga kipas akan bekerja untuk mendinginkan baterai. Dapat dilihat setelah bekerjanya kipas suhu akan cenderung konstan sehingga dapat melawan sumber panas. Selanjutnya intensitas panas akan ditinggikan sehingga kipas tidak mampu mengimbangi sehingga suhu baterai meningkat menyentuh 45 °C dimana relay dan PWM akan off menandakan rangkaian baterai telah terbuka.

C. Analisis Data Pengujian Ekualisasi



Gambar 17. Grafik Pengujian Ekualisasi

Pengujian ekualisasi adalah 4 buah baterai *lithium-ion* NCR18650PF terusun seri. Gambar 4.17. menunjukkan waktu yang dibutuhkan untuk melakukan proses ekualisasi baterai adalah 48 menit. Walaupun terlihat ada anomali tegangan yang disebabkan *error* pemantauan tegangan. Namun ini membuktikan bahwa sistem ekualisasi bekerja sesuai yang diharapkan setelah ditambahkan sistem pemantauan dan proteksi.

V. KESIMPULAN

Pemantauan tegangan baterai tersusun seri menggunakan IC BQ76925 dapat dilakukan sesuai dengan disesain dengan *error* tertinggi 1,25%. Sedangkan, pemantauan suhu baterai

dengan LM35 dapat dilakukan sesuai desain namun dengan *error* yang lebih tinggi menyentuh 4,97% untuk *error* tertinggi. Translasi tegangan ke bentuk state of charge dapat dilakukan namun rentan mengalami *error* karena pembacaan tegangan baterai yang masih memiliki *error* serta pengujian *state of charge* yang memiliki *error*.

Proteksi terhadap *overvoltage* dan *undervoltage* dapat dilakukan seketika pemantauan tegangan mendeteksi adanya tegangan baterai yang melebihi toleransi sehingga dapat memutuskan relay dan menonaktifkan PWM. Sedangkan, untuk proteksi terhadap *overheat* dapat dilakukan seketika pemantauan suhu mendeteksi adanya masalah suhu dengan proteksi preventif berupa proses pendinginan baterai ketika mencapai 35 °C dan pemutusan relay dan menonaktifkan PWM ketika mencapai 45 °C. Terakhir, proses ekualisasi 4 buah baterai *lithium-ion* terusun seri dapat dilakukan dengan waktu tempuh 48 menit.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Xiaopeng Chen, Weixiang Shen, Thanks Tu VO, Zhenwei Caoi, Ajay Kapoor. "An Overview of Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles". International Power & Energy Conference. December 2012.
- [2] Amir Hossein Ranjbar. Anahita Banei. Amir Khoobroo. Babak Fahimi. "Online Estimation of State of Charge in Li-Ion Batteries Using Impulse Response Concept". IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 3, No. 1. March 2012
- [3] Weigui Ji. Xi Lu. Yuan Ji. Yingbin Tang. Feng Ran. Fan Zheng Peng. "Low Cost Battery Equalizer Using Buck-Boost and Series LC Converter with Synchronous Phase-Shift Control". Applied Power Electronic Conference and Exposition (APEC). March 2013.
- [4] Kim, Choll-Ho. Kim, Moon-Young. Moon, Gun-Woo. "A Modularized Charge Equalizer Using a Battery Monitoring IC for Series-Connected Li-Ion Battery Strings in Electric Vehicles". IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 28, No. 8. August 2013.
- [5] Kyung-Min Lee. Yoo-Chae Chung. Chang-Hyeon Sung. Bongkoo Kang. "Active Cell Balancing of Li-Ion Batteries Using LC Series Resonant Circuit". IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 2, No. 9. September 2015.
- [6] Priyana, Soni, "Ekualisasi Baterai Tersusun Seri Menggunakan Konverter Buck-Boost dan LC Seri dengan Synchronous Phase Shift Control", Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Surabaya, Juli, 2015
- [7] Electropedia Admin, 2005. "Battery Protection Methods". <http://www.mpoweruk.com/protection.htm>, diakses 29 Mei 2016.